

Chapitre II STABILITÉ DES ISOTOPES ET RADIOACTIVITÉ

Préambules : Avant d'aborder ce chapitre, vous devez revoir les notions de nucléons, d'isotopes, du MeV, de fermi. Vous devez pouvoir résoudre une équation différentielle du 1^{er} et/ou 2^{ème} ordre avec second membre et revoir les notions d'intégrale et d'intégration par parties

Objectifs du chapitre :

Après une étude attentive de ce chapitre, vous serez capable :

- D'énoncer le principe fondamental de la conservation de l'énergie, de définir l'équivalence masse-énergie.
- D'expliquer les notions de défaut de masse, d'énergie de liaison et d'énergie de liaison par nucléon.
- De faire la distinction entre réactions nucléaires de fusion et de fission.
- D'expliquer pourquoi certains noyaux ont tendance à donner des réactions de fusion et d'autres des réactions de fission.
- De donner des exemples de modèles nucléaires et leurs limites.
- De définir les radioactivités naturelle et artificielle
- D'interpréter la courbe d'Aston et le diagramme de Segré
- De distinguer les différents types de rayonnement, les lois de conservations énergétiques et celles de la désintégration radioactive
- D'expliquer les notions de période, de constante radioactive, de durée de vie moyenne d'un radioélément et d'embranchements radioactifs.

Contenus du chapitre

II.1 STABILITÉ DES NOYAUX ATOMIQUES

- Défaut de masse- Équivalence masse-énergie – énergie de liaison
- Les modèles nucléaires.
- Stabilité des isotopes : Vallée de stabilité

II.2 LA RADIOACTIVITÉ

- Les différents types de radioactivités
- Lois de conservation
- Bilan énergétique d'une réaction nucléaire

II.3 LOIS DE LA DESINTEGRATION RADIOACTIVE

- Le noyau fils est stable/instable
- Période et vie moyenne
- Activité et unité de radioactivité

II.4 EMBRANCHEMENTS RADIOACTIFS

II.5 RADIOACTIVITÉ NATURELLE : FAMILLES RADIOACTIVES

II.6 REACTIONS DE TRANSMUTATION

II.7 DATATIONS PAR LA RADIOACTIVITÉ

- Datation au carbone 14
- Datation au plomb

CHAPITRE II STABILITE DES ISOTOPES ET RADIOACTIVITE

1^{ère} PARTIE (AMPHIS B & C)

II.1 STABILITE DES NOYAUX ATOMIQUES

II.1.1 Équivalence masse-énergie - Défaut de masse

a) Équivalence masse-énergie

- La loi de conservation de la masse ou loi de Lavoisier dit : « la masse totale d'un ensemble de corps chimiquement isolé de l'extérieur est invariable quelles que soient les transformations chimiques intervenues. »

- Par contre dans le domaine subatomique, l'étude des chocs inélastiques entre particules animées de grandes vitesses montre que la matière peut partiellement disparaître au profit de l'apparition d'une énergie.

- La masse est une des formes que peut prendre l'énergie (Théorie de Einstein 1905)

- la loi de Lavoisier reste valable dans ce domaine puisqu'il y a équivalence entre masse et énergie

Postulat de Einstein : Tout système matériel, au repos de masse m , possède du fait de cette masse, une énergie E appelé énergie de masse définie par :

$$E = m \cdot c^2$$

La grandeur Masse-Énergie se conserve (principe de la conservation de l'énergie).

b) Défaut de masse et énergie de liaison

Si on considère un noyau X et de masse M_N . On a toujours :

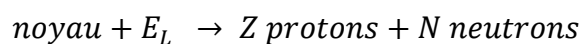
$$M_N < Z \times m_p + (A - Z) \times m_n$$

La différence $\delta m = [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M_N] \cdot c^2$ est appelée défaut de masse.

- $E_L = \delta m \cdot c^2$ est une énergie et représente l'énergie qui serait libérée au cours de la réaction :



Définition : L'énergie de liaison E_L correspond à l'énergie qu'il faut fournir à un noyau au repos pour le dissocier en nucléons isolés et immobiles



- Une énergie comptée **positivement** car reçue par le système (noyau)

Application 1 (PC1 2008): Le noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$ a pour 4,0026 uma. Déterminer :

A1 L'énergie totale de liaison du noyau en MeV sachant que les masses du proton et du neutron sont respectivement 1,007565 et 1,008665 uma.

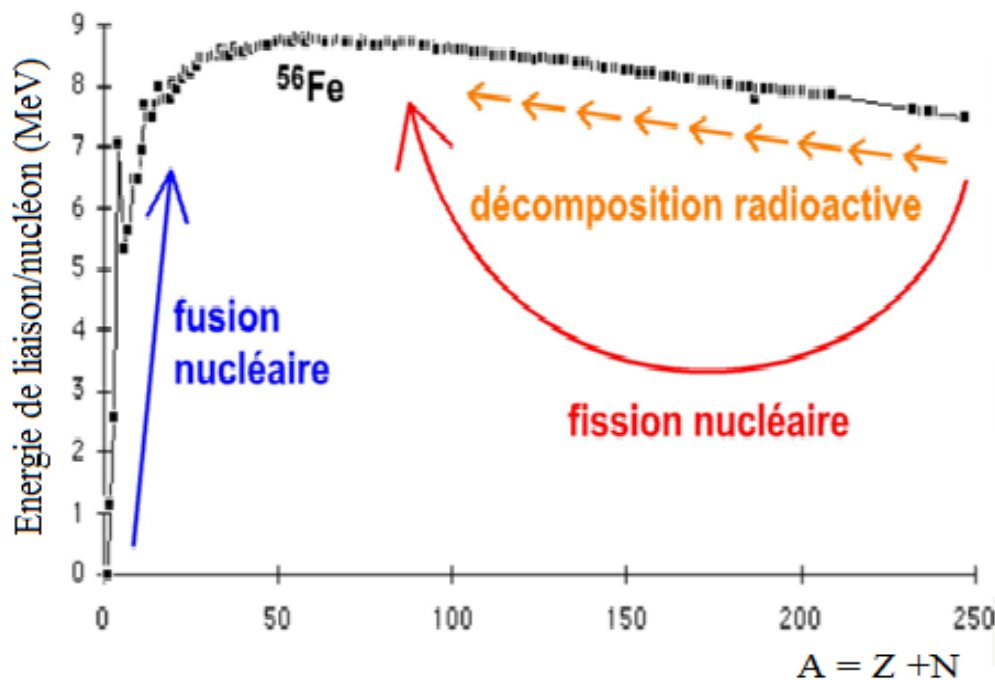
I.2. L'énergie minimale nécessaire pour libérer un nucléon de ce noyau.

c) Énergie de liaison par nucléon

- La stabilité d'un noyau dépend, dans les faits, de son énergie de liaison par nucléon E_A .

- $E_A = E_L/A$ représente l'énergie moyenne de liaison par nucléon.

- Un noyau est d'autant plus stable que son énergie de liaison par nucléon est élevée.
- La courbe d'Aston montre la relation entre la stabilité d'un noyau et E_A

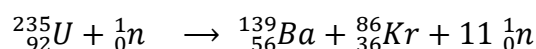
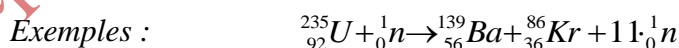


À partir de la courbe $E_A = f(A)$, dite courbe d'Aston, on remarque :

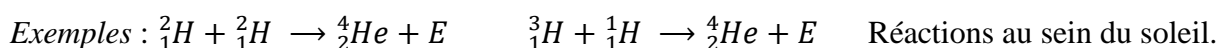
- l'énergie moyenne de liaison par nucléon est d'environ de 5 à 9 MeV (sauf pour les noyaux très légers)
- La courbe est assez régulière, présente un maximum de 8,7 MeV pour les noyaux voisins du fer ($A \approx 56$) et reste voisin de 8.0 MeV/nucléon.
- La courbe augmente rapidement pour les atomes légers ($A < 30$) en présentant des pics pour les noyaux à nombres pairs de neutrons et de protons ${}^4_2\text{He}$; ${}^{12}_6\text{C}$; ${}^{16}_8\text{O}$ (très stables)
- Elle passe par un maximum pour les valeurs de A comprises entre 40 et 100 puis décroît très lentement pour atteindre 7.6 MeV/nucléon pour l'uranium 238.

La tendance des éléments à évoluer vers une stabilité plus grande explique qu'il soit possible de produire de l'énergie nucléaire par deux processus pourtant inverse l'un de l'autre et donc l'existence de 2 types de réaction nucléaire : la fission et la fusion.

-La fission : C'est la scission d'un noyau lourd en noyaux moyens plus stables avec libération d'une grande quantité d'énergie.



- **La fusion** : Elle consiste en l'association de deux noyaux légers ($A < 10$) produisant un noyau plus lourd avec libération d'une énergie considérable.



II.1.2 Les modèles nucléaires.

Le noyau est complexe vu sa petitesse et la très énergie qui y est mise en jeu. L'élaboration d'un modèle nucléaire est aussi difficile

- Le modèle de la goutte liquide :

- Le noyau est assimilé à un fluide incompressible de masse volumique constante ($\rho = 1,45 \cdot 10^{14}$ g/cm³) et de forme sphérique de rayon $r = R_0 \cdot A^{\frac{1}{3}}$ (avec $R_0 = 1.414$ Fermi).

- La cohésion des nucléons dans ce modèle est assurée par des forces nucléaires très fortes et de courtes portées (1 fermi) qui prédominent sur les forces coulombiennes.

- Inconvénients du modèle de la goutte de liquide

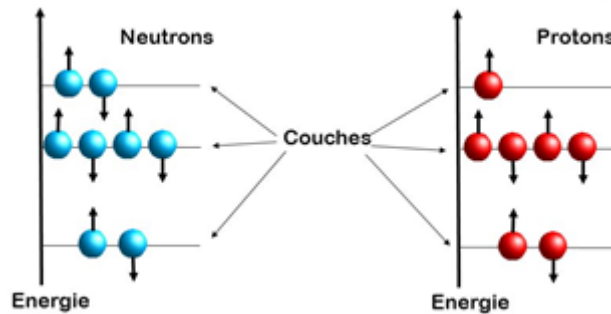
- 1°) La plupart des noyaux ne sont pas sphériques et leur rayon ne varie pas rigoureusement avec $A^{1/3}$.

- 2°) La stabilité de certains noyaux, anormalement élevée, ne peut s'expliquer à partir de ce modèle.

En effet les noyaux contenant un nombre de nucléons égal à 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126,184,.... sont particulièrement stables. Ces nombres sont qualifiés de nombres magiques.

- Le modèle à couches :

Le modèle en couches est un modèle de structure nucléaire comparable au modèle planétaire atomique. Dans ce modèle les nucléons se répartissent en couches.



Une couche est pleine lorsqu'elle contient un nombre de protons ou de neutrons égal à un nombre magique 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126...

Ce modèle s'est montré très fécond dans l'interprétation des propriétés statiques du noyau en particulier de leur stabilité.

II.1.2 Stabilité des isotopes : Vallée de stabilité

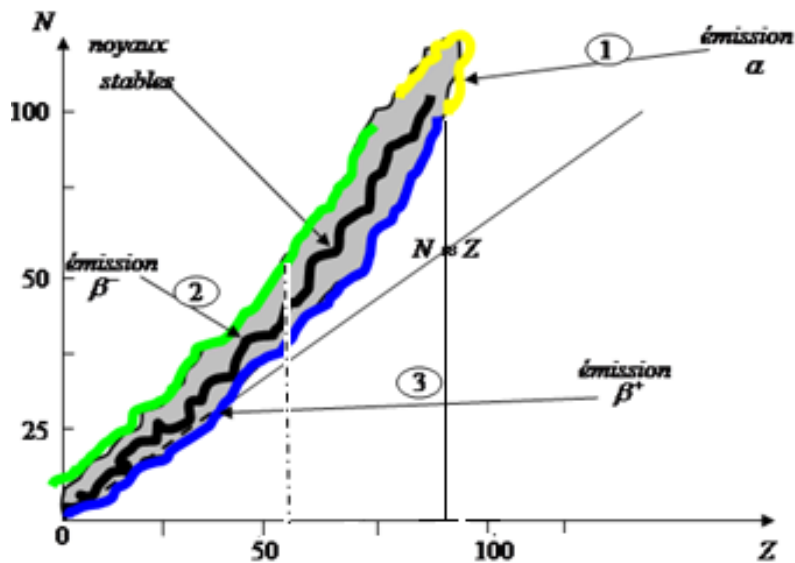
Un des principaux facteurs d'instabilité est la répulsion électrostatique qui peut être modérée par la présence de neutrons.

- Les noyaux les plus stables sont ceux pour lesquels $N \approx Z$ (pour $A \leq 40$ c'est à dire $Z \leq 20$).

- Pour $Z > 20$, la répulsion coulombienne augmente trop avec Z et les atomes lourds stables sont ceux pour lesquels $N \approx 1,6 Z$.

Il apparaît ainsi une relation directe entre N , Z et la stabilité des éléments.

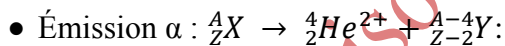
Le diagramme de Segré ($N = f(Z)$) permet de mettre en évidence cette relation.



- Les éléments stables se situent dans une étroite bande appelée **vallée de stabilité**.
- Les isotopes d'un même élément sont situés sur une même ligne verticale.
- La vallée de stabilité ne se poursuit pas au-delà du bismuth ^{209}Bi ($Z = 83$).

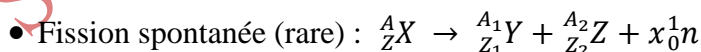
Après le bismuth, tous les nucléides sont instables. Les autres atomes instables se répartissent dans trois régions différentes.

1°) – Zone 1 (Excès de nucléons) : C'est la zone des noyaux lourds (N et Z élevés et donc A grand), l'émission de stabilisation se fait par perte de masse maximum, par :



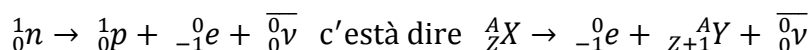
Les particules α sont des noyaux d'hélium ou hélions émis essentiellement par les noyaux lourds. Lors d'une émission α , le numéro atomique de l'atome diminue de 2 unités et le nombre de masse de 4.

- Les particules α sont très énergétiques (de 4 à 9 MeV), peu pénétrantes.
- Leur parcours est rectiligne, fini et est de quelques cm dans l'air, 8 μm dans les tissus vivants. - Elles ont des vitesses de l'ordre 10^7m/s et sont très ionisantes.



C'est la fission d'un noyau de manière spontanée (sans action de l'extérieur) avec libération d'une grande quantité d'énergie.

2°) – Zone 2 (Excès de neutrons) : Au niveau de la bordure supérieure se concentrent les atomes qui émettent de charges négatives. Le noyau contient trop de neutrons et ceux-ci se transforment en protons qui restent dans le noyau et en électrons qui en sont expulsés sous forme de β^-



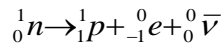
- Les particules β^- sont des électrons négatifs (négatons).

- Elles sont émises par les noyaux excédentaires en neutrons

- $\bar{\nu}_0$ est l'antineutrino (particule neutre de masse $m = 0$)

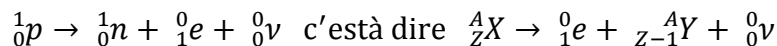
C'est une transmutation isobarique (même A). Elle est observée avec les radionucléides naturels.

Le négaton est formé lors de la transformation, dans le noyau, d'un neutron en un proton :



3°)- Zone 3 (Excès de protons) : Sur la bordure inférieure, l'instabilité est conférée par un excès de protons et la stabilisation se fait :

- *Par émission β^+* c'est-à-dire qu'un proton se transforme en neutron



- Les particules β^+ sont des électrons positifs (positons)

- Le positon est l'antiparticule de l'électron c'est à dire une particule de même masse mais de charge opposée.

- L'émission β^+ est une transmutation isobarique

- ${}^0_0\nu$ est le neutrino, particule de charge et de masse égales à 0 (au repos).

- *Par capture électronique* c'est-à-dire que le proton absorbe un électron du cortège périphérique et devient un neutron :

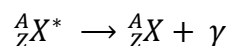


- La capture électronique est une réaction en compétition avec β^+ .

- Le noyau capture un électron des couches les plus internes (K ou rarement L).

- l'électron capté se combine avec un proton pour donner un neutron

4°) Excès d'énergie : Un atome dans un état excité (${}^A_ZX^*$) est un isomère d'un atome A_ZX . Il retourne à son état fondamental avec émission d'un rayonnement γ :



- Les rayons γ sont des radiations électromagnétiques de très courtes longueurs d'onde

- Elles sont émises lors du passage d'un noyau d'un état excité (${}^A_ZX^*$) ou d'un état métastable (${}^{Am}_Z X^*$ c'est à dire de période mesurable) à son état fondamental :

- L'émission γ ne modifie ni le numéro atomique, ni le nombre de masse

Conclusion : Le caractère radioactif de certains éléments résulte d'une tendance générale à un ajustement des proportions relatives des deux constituants nucléaires pour donner finalement un édifice plus stable par émission d'énergie.

La stabilité des noyaux est liée à la parité de N et de Z. La majorité des noyaux stables ont un nombre pair de neutrons et de protons. Par ailleurs, si le nombre de neutrons et/ou de protons est

un nombre magique (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126,.....184,....) alors le noyau a une stabilité particulière et le nucléide correspondant est relativement abondant dans la nature.

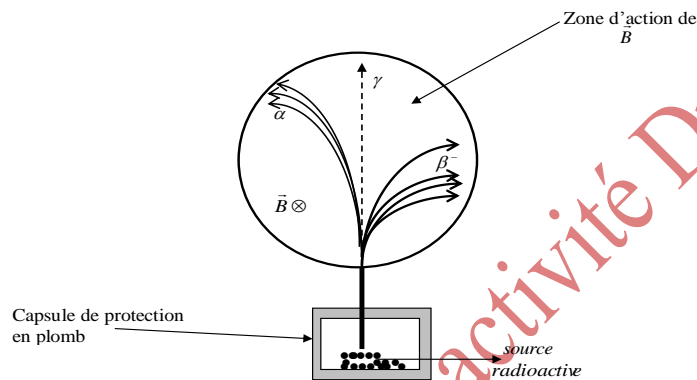
II.2 LA RADIOACTIVITE

La radioactivité naturelle est l'émission spontanée de rayonnements corpusculaires et éventuellement électromagnétiques par certains noyaux dits radioactifs ou radioéléments.

Il existe une radioactivité artificielle

II.2.1 Les différents types de radioactivités

II.2.1.1 Mise en évidence

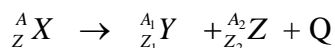


La mise en évidence des différents types de radioactivités a été réalisée par Rutherford. En utilisant l'action de champs magnétiques intenses, il montra que les rayons émis par les radioéléments naturels sont constitués de 3 types de rayonnements : α , β et γ . Plus tard, d'autres types de rayonnements sont mis en évidence. Six différents types de transformations radioactives sont connus à ce jour

Type de radioactivité	Nature du rayonnement émis	Noyau formé
A	Particules α (hélicons)	${}_{Z-2}^{A-4}X$
β^-	Électrons et antineutrinos	${}_{Z+1}^AX$
β^+	Positons, neutrinos	${}_{Z-1}^AX$
Capture électronique	Neutrinos, et réarrangement électronique (rayons X)	${}_{Z-1}^AX$
Fission spontanée	Fragments de fission et neutrons	2 noyaux de A moyen
Emission γ	Isomères nucléaires ou électrons de conversion	${}_{Z}^AX$

II.2.1.2 Lois de conservation

Dans les réactions nucléaires, les grandeurs suivantes sont conservées :



- L'énergie totale

$$E : (=T + m.c^2)$$

- La quantité de mouvement

$$\vec{p}$$

- Le nombre de charge

$$Z : (= Z_1 + Z_2)$$

- Le nombre de nucléons

$$A : (= A_1 + A_2)$$

- Le moment angulaire total

$$\vec{I}$$

II.2.1.3 Bilan énergétique d'une réaction nucléaire

a) Énergie Q dégagée lors de la réaction

Si nous considérons l'équation de conservation de l'énergie de masse, on a :

$$m_X \cdot c^2 = m_Y \cdot c^2 + m_Z \cdot c^2 + Q \Rightarrow Q = (m_X - m_Y - m_Z) \cdot c^2$$

Où d'une façon générale :

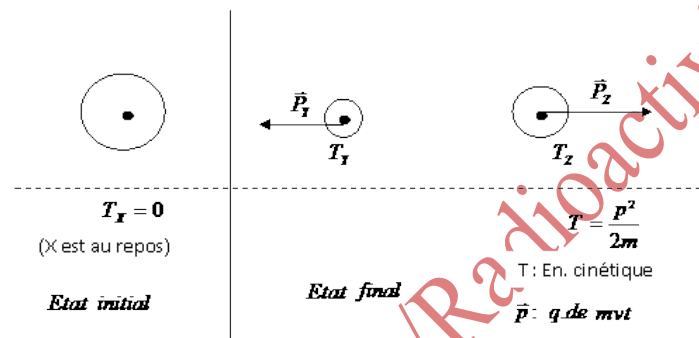
$$Q = \left(\sum_i m_i - \sum_j m_j \right) \cdot c^2$$

Q : énergie dégagée lors de la réaction

m : masse nucléaire au repos

c : célérité de la lumière

b) Énergie cinétique T des noyaux émis



Lois de conservation :

$$\begin{cases} \vec{0} = \vec{p}_Y + \vec{p}_Z & (1) \\ Q = (m_X - m_Y - m_Z) \cdot c^2 = T_Y + T_Z & (2) \end{cases}$$

L'équation (2) indique que l'énergie de masse de X est transmise sous forme d'énergie cinétique à Y et Z, c'est à dire :

$$(m_X \cdot c^2 + T_X) = (m_Y \cdot c^2 + T_Y) + (m_Z \cdot c^2 + T_Z)$$

C'est à dire

$$(m_X - m_Y - m_Z) \cdot c^2 = T_X + T_Y + T_Z \quad (T_X = 0, X \text{ au repos})$$

En projetant (1) sur l'axe (xOx'),

$$\begin{cases} p_Y = p_Z \\ Q = T_Y + T_Z \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} p_Y^2 = p_Z^2 \\ Q = T_Y + T_Z \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2m_Y T_Y = 2m_Z T_Z \\ Q = T_Y + T_Z \end{cases} \Rightarrow Q = \left(\frac{m_Z}{m_Y} + 1 \right) T_Z$$

D'où

$$T_Z = \frac{m_Y}{m_Y + m_Z} \times Q \text{ et } T_Y = \frac{m_Z}{m_Y + m_Z} \times Q \Rightarrow \frac{T_Z}{T_Y} = \frac{m_Y}{m_Z} \Rightarrow T_Z = \frac{m_Y}{m_Z} T_Y$$

Si Z est la particule la plus légère, elle acquiert $\frac{m_Y}{m_Z}$ fois plus d'énergie que le noyau le plus lourd

Exemples :

$$- {}^{212}_{83}\text{Bi} \rightarrow {}^{208}_{81}\text{Tl} + {}^4_2\text{He} + Q \Rightarrow T_\alpha = \frac{208}{4} T_{\text{Tl}} = 52 T_{\text{Tl}}$$

$$- {}^{232}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{228}_{88}\text{Ra} + {}^4_2\text{He} + Q \Rightarrow T_\alpha = \frac{228}{4} T_{\text{Ra}} = 57 T_{\text{Ra}}$$